

## 应用环境同位素分析吉林市松花江水与地下水的联系

代雅建, 崔健, 王晓光

(沈阳地质矿产研究所, 辽宁 沈阳 110034)

**摘要:** 水的环境同位素可以用来研究地下水的来源、地表水和地下水的关系, 进而间接判断水质的相互影响。通过松花江吉林市江段两条剖面的氘、氚、氧同位素特征分析, 结合水化学及水文地质条件, 阐明了吉林市地下水来源以现代当地大气降水为主, 仅在市区部分江段 500 m 范围之内受松花江水影响, 并计算了该段江水对地下水的补给比例。为判断当地突发性水污染事件对地下水的影响范围及污染防治提供了依据。

**关键词:** 环境同位素; 松花江; 地下水; 补给; 吉林市

## APPLICATION OF ENVIRONMENTAL ISOTOPES IN THE ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP BETWEEN THE SONGHUAJIANG RIVER AND GROUNDWATER IN JILIN

DAI Ya-jian, CUI Jian, WANG Xiao-guang

(Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, Shenyang 110034, China)

**Abstract:** The water environmental isotopes can be used to study the source of groundwater and the relationship between surface and ground water, so that to indirectly judge the interaction of each other. By  $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$  and  $^3\text{H}$  isotope analysis in Jilin section of Songhuajiang River, with chemical and hydrogeological conditions, it is concluded that the groundwater is mainly from atmospheric water, and is influenced by Songhuajiang River only around 500 m long in urban area. The supply ratio of river water to groundwater in this section is found out. It provides a basis for the control and prevention of water pollution incident.

**Key words:** environmental isotopes; Songhuajiang River; groundwater; supply; Jilin

环境同位素主要用于地球化学和物理水文地质学调查的补充。环境同位素不仅能够指示地下水的起源, 同时还可以指示地下水补给过程、各种补给来源的比例、流向等实际应用问题<sup>[1-2]</sup>。

近年来松花江流域一些突发性水污染事件使社会经济受到重大损失, 饮水安全受到严重威胁。本次工作目的即是根据环境同位素在水循环中标记性的特点<sup>[3-4]</sup>, 研究地下水与江水的水力联系、江水对地下水的影响程度、范围, 进而间接判断突发水污染事件

对地下水影响范围。

### 1 水文地质条件概况

吉林市位于第二松花江上游, 长白山-千山隆起带构造剥蚀丘陵区。地貌组成有构造剥蚀丘陵、冲洪积平原和冲积河谷平原。本次研究区域主要位于冲积河谷平原和一级、二级阶地, 海拔标高 175~200 m。第四系沉积物的分布主要受松花江河道变化的影响。含水层岩性主要为粉土、中粗砂、砾砂、圆砾及卵石(图 1), 水位

收稿日期: 2010-06-21; 修回日期: 2010-10-04。编辑: 欧阳兆灼, 张哲。

基金项目: 中国地质调查局“松花江重点地段地下水环境污染调查”项目(1212010634609)资助。

作者简介: 代雅建(1980—), 男, 硕士, 工程师, 从事水文地质、工程地质研究工作, 通信地址 沈阳市黄河北大街 1 号, E-mail/snapdyj@163.com

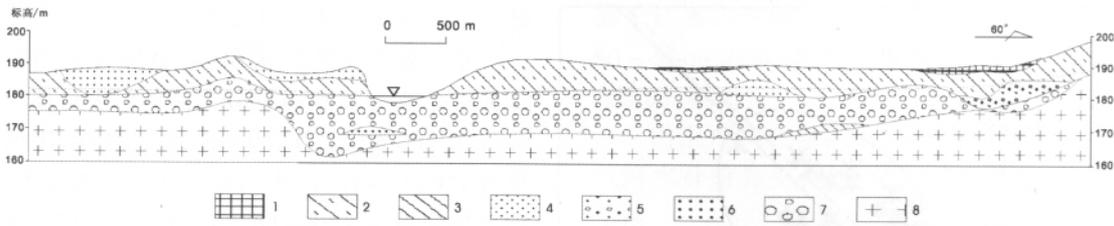


图 1 哈达湾水文地质剖面图

Fig. 1 Hydrogeologic cross-section in Hadawan

1—杂填土(miscellaneous fill); 2—粉质黏土(silty clay); 3—粉土(silty soil); 4—粉细砂(fine sand); 5—砾砂(gravel sand); 6—圆砾(rounded pebble); 7—卵石(gravel); 8—花岗岩(granite)

埋深 5~10 m, 厚度 4~20 m, 水力梯度 2/1000~3/1000. 地下水补给主要包括大气降水、灌溉水回渗、河水侧向补给、地下水径流补给. 地下水在含水层中运移经历了许多水文作用, 植被吸收、蒸发、包气带消耗、人工开采、侧向径流等在地下水系统中均可产生不同作用.

2 环境同位素特征

2.1 取样情况

2006 年 9 月和 2007 年 5 月分别在吉林市松花江上、下游设置两条剖面. 一条为穿过中石化吉林双苯厂的哈达湾剖面, 另一条为穿过吉林市农业用水水源地的腰通溪剖面(图 2). 丰枯两期地下水各取样 18 件, 江水取样各 2 件, 大气降水取样各 1 件. 地下水取样层位均为浅层地下水.

所有地下水样品直接从井口采集, 采样前抽出井筒 3~5 倍的水量. 地表水直接从河流采集. 测试项目为  $^{18}\text{O}$ 、 $^2\text{H}$  和  $^3\text{H}$ , 由国土资源部水文地质专业测试中

心测试. 稳定氧同位素  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  分析精度分别为  $\delta^{18}\text{O}: \pm 0.1\text{‰}$ ,  $\delta\text{D}: \pm 2\text{‰}$ . 放射性同位素  $^3\text{H}$  测试结果以氚单位(TU)表示, 检测限为 3TU, 不确定度是  $\pm 3\text{TU}$ .

2.2 结果分析

2.2.1 稳定同位素总体特征

根据测试结果, 吉林市松花江沿岸地带各种水体中地下水最富集重同位素, 地表水(即松花江水)次之, 大气降水最低. 多数取样点样品  $\delta\text{D}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  值丰水期高于枯水期, 季节效应比较明显(表 1).

表 1  $\text{D}$ 、 $^{18}\text{O}$  同位素测试结果

Table 1 Test results of D and  $^{18}\text{O}$  isotopes

季节	水体	样品数	$\delta\text{D}$ 范围 ‰	平均值 ‰	$\delta^{18}\text{O}$ 范围 ‰	平均值/ ‰
丰水期	地下水	18	-61 ~ -76	-67.1	-8.7 ~ -11.1	-10
	地表水	2	-71 ~ -73	-72	-10.9 ~ -11.2	-11.05
	大气降	1	-75	-75	-11.8	-11.8
枯水期	地下水	18	-65.9 ~ -75.3	-71.2	-9.19 ~ -10.08	-10.13
	地表水	2	-74.8 ~ -78.1	-76.45	-10.81 ~ -10.89	-10.85
	大气降	1	-80.5	-80.5	-11.15	-11.15

测试单位: 国土资源部水文地质专业测试中心.

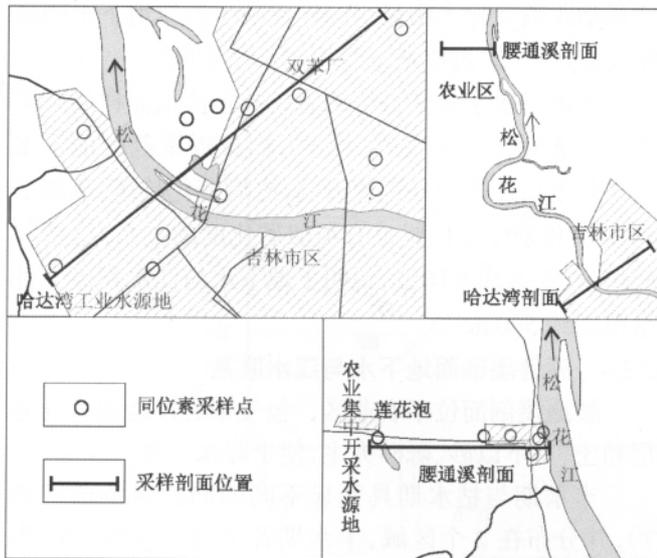


图 2 取样点分布图

Fig. 2 Distribution of sampling points

在吉林市不同水体的  $\delta\text{D}$ - $\delta^{18}\text{O}$  关系图(图 3)上, 丰水期浅层地下水、江水多分布在松辽平原降水线附近, 枯水期大气降水、地下水、江水多分布在长白山区降水线附近. 说明其降水同位素兼具两区降水特征. 多数取样点样品  $\delta\text{D}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  值丰水期高于枯水期, 显示出一定的季节效应. 地下水、江水总体蒸发趋势不明显, 即被测定的水最初来源于当地大气降水.

三种水体中地下水相对更富集重同位素, 江水次之, 所取两期降水样最贫重同位素. 各水体同位素测试结果差别明显, 远高于测试精度, 可以用来标记水体. 而江水与部分地下水分布在同一区域范围, 难以截然分开, 反映出两者具有密切的水力联系.

2.2.2 放射性同位素氚总体特征

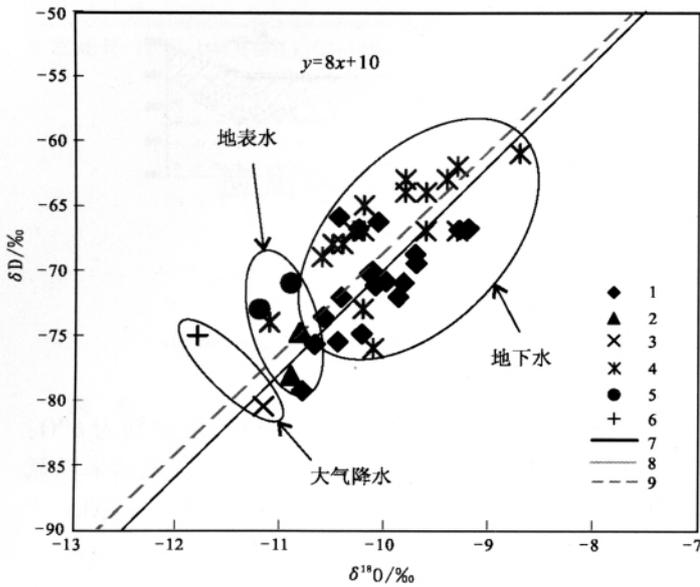


图3 吉林市天然水的 δD-δ¹⁸O 图

Fig. 3 δD-δ¹⁸O diagram of natural water

1—枯地下水 (groundwater in dry season); 2—枯地表水 (surface water in dry season); 3—枯大气降水 (atmospheric precipitation in dry season); 4—丰地下水 (groundwater in wet season); 5—丰地表水 (surface water in wet season); 6—丰大气降水 (atmospheric precipitation in wet season); 7—全球降水线 (globe precipitation line); 8—松辽平原降水线 (Songliao Plain precipitation line); 9—长白山降水线 (Changbai mountain precipitation line)

松辽平原和长白山区大气降水氘浓度具有明显的“颤抖性”和“不均一性”，同一年内的时间地点差异可使降水氘浓度相差 1~5 倍<sup>[5]</sup>。而近年来大气降水氘也已经恢复到污染前的水平。本次地下水 and 地表水丰、枯水两期样品氘同位素值在 11.8~46.3 TU 之间，所取的大气水样氘值丰水期为 31 TU，枯水期小于 1 TU。可以认为均属于现代大气降水成因 (表 2)。

2.2.3 哈达湾剖面地下水与江水联系

哈达湾剖面位于城区，多为硬化地面，包气带岩性以粉质黏土为主，渗透性较差，而地下水丰枯两期同位素特征相差不大，沿剖面变化特征相近，由此推知地下水受大气降水入渗和潜水蒸发的影响不大，其可能来

表 2 氘同位素测试结果

Table 2 Test results of Tritium isotope

季节	水体	氘值范围/TU	平均值/TU
丰水期	地下水	12~18	14.7
	地表水	13~25	19
	大气降水	31	31
枯水期	地下水	11.8~46.3	20.2
	地表水	12.6~21.5	17
	大气降水	<1	<1

测试单位：国土资源部水文地质专业测试中心。

源主要为地下径流或江水补给。

根据地下水和江水 δD-δ¹⁸O 同位素特征，哈达湾剖面地下水与江水可划分为两组 (图 4)，I 组为江水样和江边 500 m 范围内的两个地下水样，II 组为距江边稍远的地下水样，江水与近岸地下水同位素特征相同，而与远岸地下水具有明显差别，显示近岸地下水与江水水力关系密切。

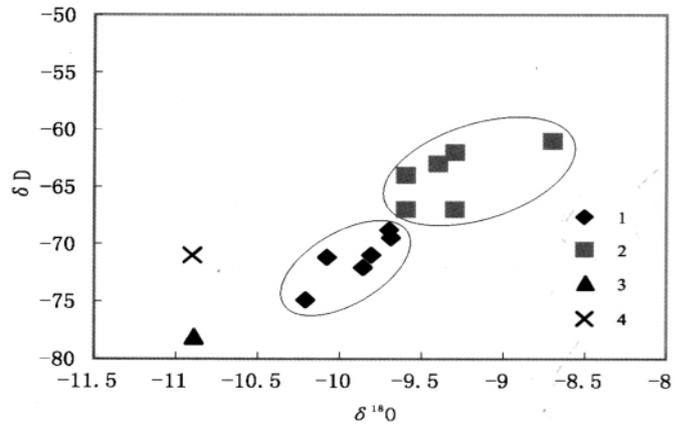


图 4 哈达湾剖面稳定同位素特征

Fig. 4 The characteristics of stable isotopes in Hadawan

1—枯地下水 (groundwater in dry season); 2—丰地下水 (groundwater in wet season); 3—枯地表水 (surface water in dry season); 4—丰地表水 (surface water in wet season)

通过分析地下水 δ¹⁸O 值与采样点到江边距离的关系可知，近岸地下水尤其是哈达湾水源地靠近江边的样品与江水相差不大 (图 5)。江边 500 m 范围内，地下水样品 δ¹⁸O 随距离增大迅速升高，相差最高约 1‰，之后随距离变化不明显，同样反映了近岸地下水明显接受江水补给，远岸地下水不受江水影响。

从地下水水化学特征来看，哈达湾剖面样品总矿化度与 δ¹⁸O 有正相关性 (图 6)，而且近岸范围地下水总矿化度由江边向外迅速升高，之后变化趋缓。氯离子与 δ¹⁸O 和采样点位置也有类似矿化度的关系。这些与 δ¹⁸O-δD 关系相互印证，说明了地下水与江水积极交替带范围约 500 m。

2.2.4 腰通溪剖面地下水与江水联系

腰通溪剖面位于农业区，包气带岩性近地表为薄层粉土，其下以砂、砾砂为主，便于降水入渗。

丰水期与枯水期具明显不同的同位素特征 (图 7)，并分布在 2 个区域，丰水期各个地下水样 δ¹⁸O 均高于枯水期，与大气降水的季节效应一致。同时地下水与江水也具不同的 δ¹⁸O 值范围，地下水 δ¹⁸O 显著

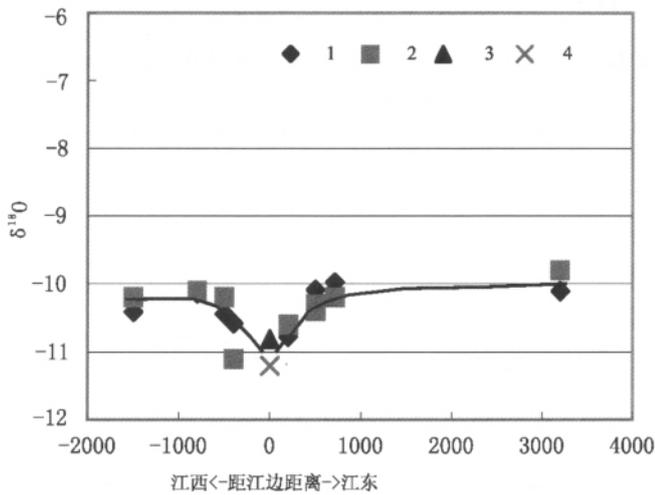


图 5 哈达湾剖面稳定同位素与到江边距离的关系  
 Fig. 5 The relationship between stable isotope and the distance to the riverside in Hadawann  
 1—枯地下水 (groundwater in dry season); 2—丰地下水 (groundwater in wet season); 3—枯地表水 (surface water in dry season); 4—丰地表水 (surface water in wet season)

高于江水, 而地下水  $\delta^{18}\text{O}$  与离江远近无关, 在江边 80~90 m 内取得 2 个地下水样与江水相差也较大 (图 8), 约 2‰.

由上可知在该剖面范围内, 地下水补给中以大气降水补给为主, 没有受到江水影响, 地下水向江水排泄.

2.2.5 江水对地下水的补给贡献比例

基于  $^{18}\text{O}$  和  $\text{D}$  同位素在地下水运动过程中稳定的地球化学行为, 常用其作为良好的示踪剂来进行流量切割, 由于  $^{18}\text{O}$  的测试精度高于  $\text{D}$ , 所以本次选取  $^{18}\text{O}$  作为示踪剂计算江水对地下水的贡献比例.

根据前面的判断, 腰通溪剖面地下水不受江水影响, 所以只计算哈达湾剖面地下水中的江水贡献比例. 由于丰枯两期地下水  $\delta^{18}\text{O}$  差别不大, 且变化趋势一致, 所以只选取丰水期测试结果进行计算.

哈达湾剖面近岸地下水补给来源主要为地下径流和江水, 远岸地下水主要来源于地下径流补给, 因

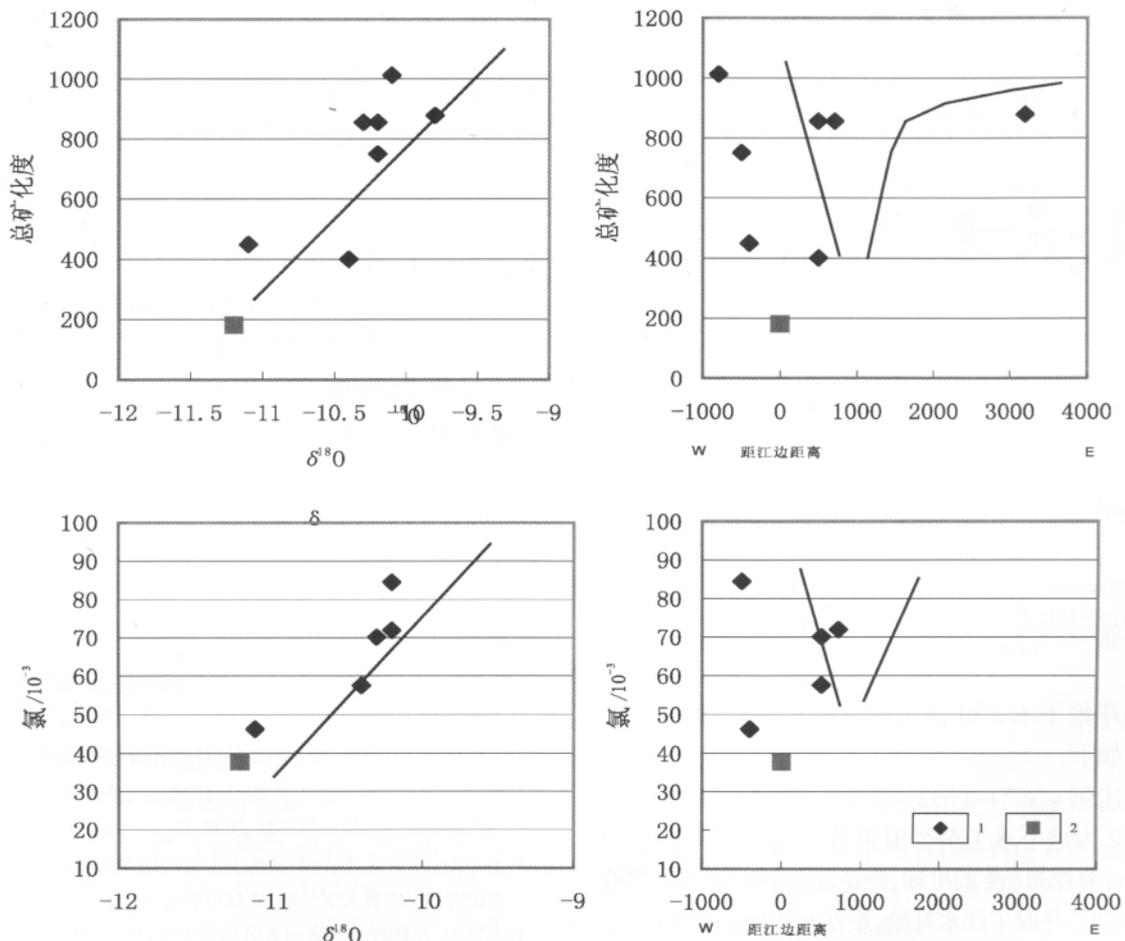


图 6 哈达湾剖面总矿化度与氯离子含量特征  
 Fig. 6 The content of total salinity and  $\text{Cl}^-$  in Hadawan  
 1—地下水 (groundwater); 2—地表水 (surface water)

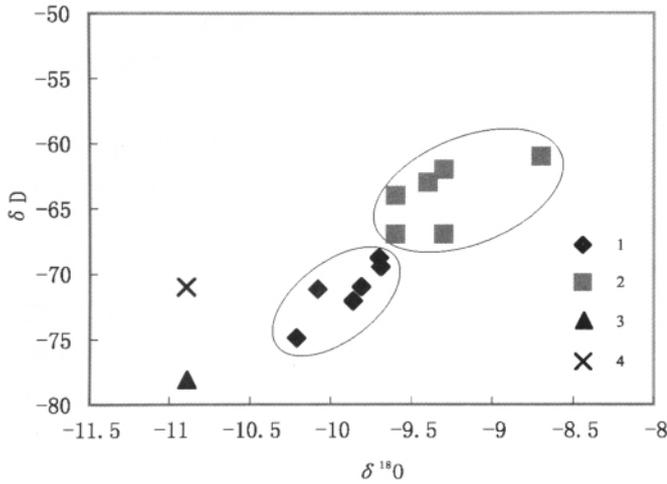


图7 腰通溪剖面稳定同位素特征

Fig. 7 The characteristics of stable isotopes in Yaotongxi

1—枯地下水(groundwater in dry season);2—丰地下水(groundwater in wet season);3—枯地表水(surface water in dry season);4—丰地表水(surface water in wet season)

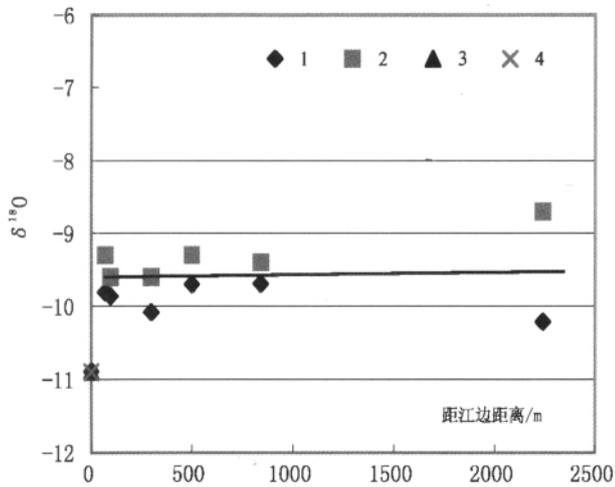


图8 腰通溪剖面稳定同位素与到江边距离的关系

Fig. 8 The relationship between stable isotope and the distance to the riverside in Yaotongxi

1—枯地下水(groundwater in dry season);2—丰地下水(groundwater in wet season);3—枯地表水(surface water in dry season);4—丰地表水(surface water in wet season)

此选取远岸地下水  $\delta^{18}O$  作为地下径流补给端元组分。计算公式如下:

$$\text{河水比例} = (\delta^{18}O - \delta^{18}O_2) / (\delta^{18}O_1 - \delta^{18}O_2) \times 100\%$$

式中,  $\delta^{18}O_2$  为地下水上游径流组分;  $\delta^{18}O_1$  为江水组分。

根据计算结果(表3)可知,松花江西侧哈达湾水源地由于开采强烈,夺取了江水补给,距江水400m范围内,江水比例高达90%,江水水质对地下水有直接影响。江东侧近岸地下水中江水比例达40%以上,且随距离增加江水比例迅速减小,包括双苯厂及其以东区域已不受江水影响。

表3 江水比例计算结果

Table 3 The calculation results of the proportion of river water in the groundwater

位置	到江边距离	$\delta^{18}O/\text{‰}$	$\delta^{18}O_1/\text{‰}$	$\delta^{18}O_2/\text{‰}$	江水比例/%
江东侧	713	-10.2	-11.2	-9.8	28.6
	500	-10.4	-11.2	-9.8	42.9
	200	-10.6	-11.2	-9.8	57.1
江西侧	500	-10.2	-11.2	-10.1	9.1
	400	-11.1	-11.2	-10.1	90.9

测试单位:国土资源部水文地质专业测试中心。

### 3 结论

(1) 研究区地下水的  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  关系基本处于大气降水线附近,氡值范围在 11.8~46.3 TU 之间,显示吉林市地下水均属当地现代大气降水成因。

(2) 哈达湾剖面丰枯两期地下水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  相近,沿剖面变化特征相似,近岸地下水随着到江边的距离增大,  $\delta^{18}O$  有升高趋势,说明在该剖面近岸约 500 m 范围内,地下水以地下径流和江水补给为主。根据计算,江水补给比例在 40% 以上,而由于哈达湾傍河水源地开采夺取了江水补给,部分近岸地段江水比例可达 90% 以上,江水水质对其有直接影响。远岸地带地下水以地下径流补给为主,流动相对缓慢。

(3) 腰通溪剖面地下水以大气降水入渗和地下径流补给为主,不受江水影响。

(4) 根据以上分析结果可知,城区地下水及其与江水关系主要表现为近岸江水对地下水的补给及远岸地下水径流缓慢的特征,城区突发性地下水污染事件不会通过地下水而对江水造成较快的难以避免的影响,通过抽取受污染地下水等方法可以控制水污染的蔓延。而如果污染类型为地表水污染,则会对近岸 500 m 范围内地下水造成较大影响。

### 参考文献:

[1] 万军伟,刘存富,等. 同位素水文学理论与实践[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2003.  
 [2] 王恒纯. 同位素水文地质概论[M]. 北京:地质出版社,1991.  
 [3] 龙文华,邸志强,李志,等. 西辽河平原(内蒙古部分)地下水的同位素特征[J]. 地质与资源,2008,17(2): 148—152.  
 [4] 苏小四,林学钰. 包头平原地下水循环模式及其可更新能力的同位素研究[J]. 吉林大学学报:地球科学版,1995.  
 [5] 王凤生. 吉林省大气降水氢氧同位素浓度场时空展布及其环境效应[J]. 吉林地质,1997.  
 [6] Clark I D, Fritz P. 水文地质学中的环境同位素[M]. 张慧,张新基,译. 郑州:黄河水利出版社,2006: 59.